

УТОЧНЕННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВІДКРИТИХ ТОНКОСТІННИХ ПОПЕРЕЧНИХ ПЕРЕРІЗІВ

У статті розглянуто питання уточнення геометричних характеристик відкритих тонкостінних поперечних перерізів сталевих балок при дії ексцентрично прикладеного навантаження, що призводить до виникнення кручення. Тримальні елементи при цьому перебувають в умовах складної просторової роботи каркасної системи. Приділено увагу необхідності врахування реальних конструктивних особливостей перерізів, що впливають на розподіл напружень та деформацій у процесі експлуатації. Досліджено вплив заокруглень у місці примикання полицки до стінки прокатних відкритих профілів, що призводить до істотного підвищення моменту інерції при вільному крученні.

Запропоновано уточнений підхід до визначення секторального моменту інерції, що враховує не лише геометричні параметри перерізу, але й жорсткісні характеристики приєднаних конструктивних елементів. Це дозволяє точніше моделювати умови роботи балки у складі просторової системи, зокрема при її жорсткому розкріпленні з площини вигину. Уточнення вказаних характеристик дозволяє уникнути суттєвих похибок при визначенні нормальних напружень у перерізі, що в свою чергу впливає на загальну просторову стійкість та експлуатаційну надійність конструкції.

Застосування уточнених характеристик дозволяє забезпечити рівномірний розподіл напружень, раціональніше використання міцності матеріалу та уникнення локальних перевантажень, що є критично важливим для тонкостінних елементів. Урахування зазначених факторів сприяє підвищенню точності розрахунків, зниженню матеріалоємності конструкцій, покращенню техніко-економічних показників і забезпеченню довговічності проєктованих об'єктів. До розрахунків, у яких використовуються ці геометричні характеристики, можна віднести звичайний розрахунок балок на загальну стійкість і альтернативний розрахунок за теорією другого порядку; розрахунок на сумісну дію поперечного вигину (в одній або двох площинах) і кручення від ексцентричності прикладення навантаження; розрахунок балок із пошкодженнями та викривленнями.

Ключові слова: геометричні характеристики, відкриті перерізи, вигин, кручення.

Постановка проблеми. Геометричні характеристики, що потребують уточнення, пов'язані з крученням балок незамкненого профілю. До них належать: момент інерції при вільному крученні, секторальний момент інерції, пружна згинально-крутильна характеристика перерізу, секторальна координата (площа), координата центра вигину, параметр моносиметричності (коефіцієнт Вагнера), параметр стійкості (допоміжна відстань перерізу при моносиметричності). Припустимо, що при розкріпленні профіля в якості центра вигину виступає перемінна точка, що проходить через вісь обертання перерізу і може переміщатися вгору або вниз залежно від ступеня розкріплення, тобто її положення залежить від жорсткості та місця розміщення приєднаних конструкцій. При достатній зсувній жорсткості приєднаних конструкцій вважається, що стиснутий пояс повністю закріплений від поперечних зміщень і вісь обертання, котру в цьому випадку називають зв'язаною, проходить по верху балки. Зсувна жорсткість бокових в'язей часто досягає достатнього значення для прийняття зв'язаної осі обертання балки.

Для перерізів, які складаються з кількох вузьких прямокутників із певною довжиною і товщиною, момент інерції при вільному крученні визначається за формулою Сен-Венана і

залежить від розмірів прямокутників. Але окрім розбиття на дві повні полицки та стінку, поперечний переріз швелера можна розкласти і на повну стінку, висота якої дорівнює висоті перерізу, та неповні полицки, що примикають до стінки. Якщо товщина полицки більша за товщину стінки, перший спосіб дає дещо вищий результат обчислення моменту інерції. Але є й інший метод розбиття перерізу на прямокутники, який призводить до усередненого результату, – по серединній лінії. Він виглядає найбільш обґрунтованим з точки зору теорії про кручення тонкостінних стрижнів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботі [1] визначено ступінь впливу заокруглення між стінкою та полицкою на емпіричний коефіцієнт η , що характеризує тип і складність поперечного перерізу. Цей коефіцієнт спрощено враховує наявність заокруглень між прямокутниками, на які розбитий поперечний переріз. Так момент інерції двотаврового перерізу при вільному крученні I_t за нормами проектування сталевих конструкцій визначається з урахуванням сталого множника $\eta = 1,29$, для швелерного перерізу прийнято $\eta = 1,11$. У праці [2] зібрано до таблиць результати визначення моменту інерції при вільному крученні для вибраних балочних двотаврів з паралельними гранями полиць (по ГОСТ 26020-83) і швелерів з ухилом полиць (по ГОСТ 8240-89). Виявлено, що для прокатних профілів, особливо з відносно великим радіусом заокруглень, ступінь наближеності визначення моменту інерції при вільному крученні може бути значним. Більш точна оцінка корекції моменту інерції для відрахувань на відкритих кінцях і його посилення на стику є виправданою і може виконуватись у програмі LTBeamN, яка показала найкращу збіжність з методом скінченних елементів, або за методикою вписаного кола, наведеною, наприклад, в роботі [3]. Значення перехідного коефіцієнта η для прокатних нормальних двотаврів, виходячи з найбільш подібних результатів у таблиці, коливається суттєво – в межах від 1,23 до 1,60 (для швелерів – від 1,05 до 1,13) і потребує аналітичного диференційованого опису. Найбільший ефект досягається для двотаврів середньої висоти (35Б1 – 45Б1) і високих швелерів (22 – 40). Наведені в [3] формули рекомендується використовувати для отримання моменту інерції I_t з урахуванням заокруглень.

У книзі [4] детально розглядаються методи визначення пружної та пластичної несучої здатності поперечних перерізів, включаючи вплив геометричних особливостей, таких як заокруглення в місцях з'єднання елементів профілю. У публікації [5] розглянуто кілька методик визначення геометричних характеристик, які закладені у спеціальну програму LTBeamN з вільним доступом, для загального випадка – моносиметричний двотавровий переріз із заокругленнями між стінкою і полицками. У статті [6] представлено іншу комп'ютерну програму для точного визначення геометричних характеристик тонкостінних балок із відкритими та замкненими поперечними перерізами. Програма враховує депланацію і топологічну структуру перерізу за допомогою теорії графів, що дозволяє отримувати надійні результати при аналізі складних багатокамерних конструкцій. Автори статті [7] окреслили ефективний скінченноелементний підхід для аналізу кручення балок з постійним поперечним перерізом, який також враховує депланацію перерізу. Запропонований елемент дозволяє підвищити точність розрахунків напружено-деформованого стану, особливо для тонкостінних балок із відкритими та замкненими перерізами, і демонструє переваги перед традиційними методами при складних умовах навантаження.

Мета дослідження. Удосконалення методики визначення крутильних і секторальних характеристик відкритих тонкостінних поперечних перерізів сталевих балок може бути проведене шляхом уточнення геометричних параметрів, зокрема заокруглень у місцях з'єднання елементів профілю, а також врахування впливу жорсткості приєднаних конструкцій. Це дозволить точніше оцінювати внутрішні зусилля, включаючи згинально-крутильний бімомент і згинальні моменти у двох площинах, і, як наслідок, забезпечити достовірну оцінку напружено-деформованого стану елементів у складі просторових систем.

Основний матеріал дослідження. Відповідно до [5] загальна площа вказаного на рис. 1 поперечного перерізу дорівнюватиме сумі площ елементів, що входять до його складу, а саме верхнього поясу (f_1), нижнього поясу (f_2), стінки (w), верхнього (r_1) і нижнього заокруглень (r_2), величини яких встановлюються за правилами знаходження площ елементарних геометричних фігур:

$$A = A_{f_1} + A_{f_2} + A_w + 2A_{r_1} + 2A_{r_2}. \quad (1)$$

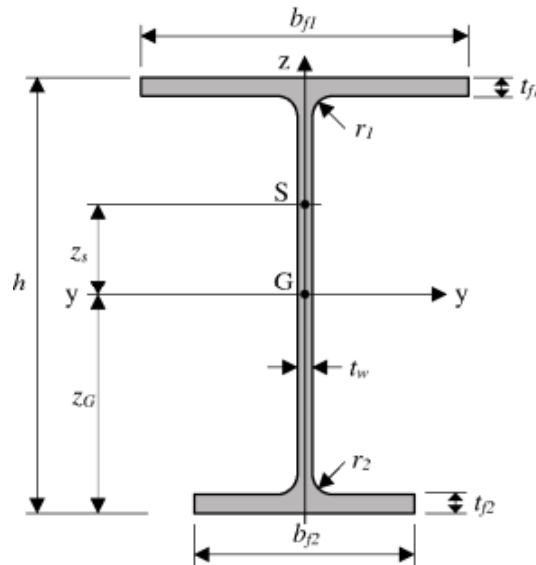


Рисунок 1 – Моносиметричний двотавровий переріз із заокругленнями між стінкою і полічками

В такому випадку ордината центра ваги (центроїда) G відносно низу перерізу дорівнюватиме:

$$z_G = \frac{1}{A} \left[A_{f_1} \left(h - \frac{t_{f1}}{2} \right) + A_{f_2} \frac{t_{f2}}{2} + A_w \left(t_{f2} + \frac{h_w}{2} \right) + 2A_{r_1} (h - t_{f1} - v_{r1}) + 2A_{r_2} (t_{f2} + v_{r2}) \right]. \quad (2)$$

Допоміжні відстані для верхнього і нижнього поясів, стінки, верхнього і нижнього заокруглень відповідно до рис. 1 становитимуть:

$$z_{f1} = h - \frac{t_{f1}}{2} - z_G; \quad z_{f2} = \frac{t_{f2}}{2} - z_G; \quad (3)$$

$$z_w = t_{f2} - \frac{h_w}{2} - z_G; \quad (4)$$

$$z_{r1} = h - t_{f1} - v_{r1} - z_G; \quad z_{r2} = t_{f2} + v_{r2} - z_G. \quad (5)$$

Моменти інерції поперечного перерізу дорівнюватимуть у такому разі:

$$I_y = I_{yf1} + I_{yf2} + I_{yw} + 2I_{r1} + 2I_{r2} + A_{f1}z_{f1}^2 + A_{f2}z_{f2}^2 + A_wz_w^2 + 2A_{r1}z_{r1}^2 + 2A_{r2}z_{r2}^2$$

$$I_z = I_{zf1} + I_{zf2} + I_{zw} + 2I_{r1} + 2I_{r2} + 2A_{r1} \left[\frac{t_w}{2} + v_{r1} \right]^2 + 2A_{r2} \left[\frac{t_w}{2} + v_{r2} \right]^2. \quad (6)$$

Для визначення моменту інерції при вільному крученні прямокутного поперечного перерізу розмірами $a \times b$, причому $a < b$, використаємо наближену формулу, використовуючи правило знаходження геометричних характеристик вищого порядку:

Ремонт та відновлення деталей машин

$$R_t(a, b) = \frac{1}{3} b a^3 \left[1 - \frac{a}{b} \left(0,633 - 0,055 \frac{a^3}{b^3} \right) \right]. \quad (7)$$

Тоді складові моменту інерції при вільному крученні для окремих прямокутних елементів становитимуть:

$$I_{t1} = R_t(t_{f1}, b_{f1}); \quad I_{t2} = R_t(t_{f2}, b_{f2}); \quad I_{t3} = R_t(t_w, h); \quad (8)$$

$$I_{t4} = R_t(\min(t_w, t_{f1}), \max(t_w, t_{f1})); \quad I_{t5} = R_t(\min(t_w, t_{f2}), \max(t_w, t_{f2})); \quad (9)$$

$$I_{t6} = R_t(\min(t_w + 0,4r_1, t_{f1} + 0,4r_1), \max(t_w + 0,4r_1, t_{f1} + 0,4r_1)); \quad (10)$$

$$I_{t7} = R_t(\min(t_w + 0,4r_2, t_{f2} + 0,4r_2), \max(t_w + 0,4r_2, t_{f2} + 0,4r_2)). \quad (11)$$

Загальний (сумарний) момент інерції поперечного перерізу сталевго елемнту при вільному крученні дорівнюватиме:

$$I_t = I_{t1} + I_{t2} + I_{t3} - \left(\frac{t_w}{b_{f1}} \right)^2 I_{t4} - \left(\frac{t_w}{b_{f2}} \right)^2 I_{t5} + \alpha_1 (I_{t6} - I_{t4}) + \alpha_2 (I_{t7} - I_{t5}). \quad (12)$$

Допоміжні коефіцієнти α при $i = 1; 2$ становитимуть для $r_i > 0$ (для $r_i = 0$ $\alpha_i = 0$):

$$\text{при } 6t_w + t_{fi} \leq b_{fi} \rightarrow \alpha_i = 4; \quad \text{при } 6t_w + t_{fi} > b_{fi} \rightarrow \alpha_i = \frac{8}{1 + \frac{6t_w + t_{fi}}{b_{fi}}}. \quad (13)$$

Розглянемо альтернативний підхід до визначення моменту інерції при вільному крученні із врахуванням заокруглень. Записавши формулу для перерізу з двома полицками та однією стінкою без заокруглень між ними, ми отримаємо:

$$I_t = [2bt_f^3 + (h - 2t_f)t_w^3] / 3. \quad (14)$$

У ДБН В.2.6-198:2014 [8] заокруглення враховується введенням емпіричного коефіцієнта ε без пояснень його призначення. Для прокатного двотавра, переріз якого розбивається на прямокутники досить однозначно (дві повні полицки та стінка), формула запишеться так

$$I_t = \varepsilon [2bt_f^3 + (h - 2t_f)t_w^3], \quad (15)$$

де ε – коефіцієнт, що приймається за таблицею К.1 ДБН В.2.6-198:2014 [8]; для прокатного двотавра він дорівнює $\varepsilon = 0,43$ (1,29/3), для прокатного швелера $\varepsilon = 0,37$ (1,11/3).

Аналогічна формула для швелера записується у такому вигляді (формула (К.5) ДБН В.2.6-198:2014 [8]):

$$I_t = 0,37 (ht_w^3 + 2bt_f^3). \quad (16)$$

Така форма запису позбавлена змісту, оскільки при врахуванні повної висоти перерізу h і повної ширини перерізу b кут між полицкою і стінкою береться двічі.

Окрім розбиття на дві повні полицки та стінку, переріз швелера можна розкласти і на повну стінку, висота якої дорівнює висоті перерізу, та неповні полицки, що примикають до стінки. Якщо товщина полицки більша за товщину стінки, перший спосіб дає дещо вищий результат обчислення моменту інерції. Але є й інший метод розбиття перерізу на прямокутники, який призводить до усередненого результату, – по серединній лінії. Він виглядає найбільш обґрунтованим з точки зору теорії про кручення тонкостінних стрижнів. Для швелера без урахування заокруглень в такому випадку запишемо:

$$I_t = [2b_s t_f^3 + h_s t_w^3] / 3. \quad (17)$$

Розглянемо альтернативний підхід до визначення моменту інерції при вільному крученні з урахуванням заокруглень. Методика, наведена нижче, була отримана на основі довідника [3]. Підвищення значення моменту інерції за рахунок заокруглень виконується за наступною схемою. D є діаметром найбільшого кола, яке може бути вписане на стику, а α є безрозмірним коефіцієнтом, отриманим за графіком або емпіричною формулою. Існують різні графіки і формули для різних перерізів. Відрахування на кожному вільному кінці становить $0,105t_f^4$. Коли є чотири кінці, як у двотавра, то необхідно робити чотири відрахування. Коли є тільки два кінці, як у швелера, то проводяться два відрахування (вище наведене посилання помилково показує чотири відрахування для швелерів).

Діаметр вписаного кола для двотавра (для Т-подібного з'єднання) задається за наступною формулою:

$$D_1 = \frac{(t_f + r)^2 + (r + 0,25t_w)t_w}{2r + t_f}. \quad (18)$$

Уточнювальний безрозмірний емпіричний коефіцієнт α_1 визначається за формулою:

$$\alpha_1 = -0,042 + 0,2204 \frac{t_w}{t_f} + 0,1355 \frac{r}{t_f} - 0,0865 \frac{rt_w}{t_f^2} - 0,0725 \frac{t_w^2}{t_f^2}. \quad (19)$$

Із поданими уточнювальними підвищувальними коефіцієнтами D_1 і α_1 , а також з урахуванням заниження на кінцях полицок, формула для визначення моменту інерції при вільному крученні набуде наступного вигляду:

$$I_t = \frac{2}{3}bt_f^3 + \frac{1}{3}(h - 2t_f)t_w^3 + 2\alpha_1 D_1^4 - 0,420t_f^4. \quad (20)$$

Діаметр вписаного кола для швелера (для L-подібного з'єднання) задається за наступною формулою:

$$D_3 = 2 \left\{ (3r + t_w + t_f) - \sqrt{2(2r + t_w)(2r + t_f)} \right\}. \quad (21)$$

Уточнювальний безрозмірний емпіричний коефіцієнт α_3 :

$$\alpha_3 = -0,0908 + 0,2621 \frac{t_w}{t_f} + 0,1231 \frac{r}{t_f} - 0,0752 \frac{rt_w}{t_f^2} - 0,0945 \frac{t_w^2}{t_f^2}. \quad (22)$$

Із поданими уточнювальними підвищувальними коефіцієнтами D_3 і α_3 , а також з урахуванням заниження на кінцях полицок, формула для визначення моменту інерції при вільному крученні для швелера набуде наступного вигляду:

$$I_t = \frac{2}{3}bt_f^3 + \frac{1}{3}(h - 2t_f)t_w^3 + 2\alpha_3 D_3^4 - 0,210t_f^4. \quad (23)$$

Уточнені формули для визначення секторального моменту інерції перерізу з ухилом полиць можна знайти в посібнику [3].

Внаслідок достатньо малого впливу заокруглень між стінкою і полицками на значення секторального моменту інерції перерізу, що встановлено в [4], у випадку моносиметричного двотаврового перерізу формула для його знаходження відносно центра вигину має спрощений вигляд:

Ремонт та відновлення деталей машин

$$I_{\omega} = I_{zf1} \left[1 - \frac{I_{zf1}}{I_z} \right] \left[h - \frac{t_{f1}}{2} - \frac{t_{f2}}{2} \right]^2; \quad (I_{zf1} \neq 0). \quad (24)$$

Секторальний момент інерції перерізу для частково розкріпленої двотаврової балки при довільній зсувній жорсткості S приєднаних конструкцій відносно точки обертання пропонується визначати за підібраною формулою, яка практично повністю відповідає результатам чисельних розрахунків (для прокатної балки співвідношення моментів інерції нижнього і верхнього поясу $\frac{I_{zf2}}{I_{zf1}} = 1$):

$$I_{\omega,D} = I_{\omega} \left(1 + \left(\frac{S}{S_a} \right)^2 \frac{I_{zf2}}{I_{zf1}} \right); \quad (I_{zf1} \neq 0); \quad (S \leq S_a), \quad (25)$$

де S_a – зсувна жорсткість приєднаних конструкцій, потрібна для прийняття зв'язаної осі обертання.

Для знаходження секторального моменту інерції швелерного перерізу доцільно використовувати формулу, але за умови, що ширина та висота перерізу беруться по серединній лінії

$$I_{\omega} = \frac{t_f b_s^3 h_s^2}{12} \cdot \frac{3 + 2\eta\psi}{6 + \eta\psi}, \quad (26)$$

де $\eta = h_s/b_s$; $\psi = t_w/t_f$ – співвідношення розмірів перерізу (рис. 2).

Для двотавра максимальна секторальна координата поперечного перерізу $\omega_{\max}$ (рис. 2) може бути спрощено визначена за формулою:

$$\omega_{\max} = 0,25 b_f h_s, \quad (27)$$

де b_f – ширина полицки;

h_s – відстань між центрами полицок.

Для моносиметричного двотавра секторальні координати поперечного перерізу ω_1 і ω_2 без розкріплення, а також координати $\omega_{1,D}$ і $\omega_{2,D}$ (рис. 2) відносно точки, яка розташована на осі обертання при розкріпленні, визначаються за формулами:

$$\omega_1 = 0,5 b_{f1} e_1; \quad \omega_2 = 0,5 b_{f2} e_2; \quad (28)$$

$$\omega_{1,D} = 0,5 b_{f1} e_{1,D}, \quad \omega_{2,D} = 0,5 b_{f2} e_{2,D}, \quad (29)$$

де b_{f1} – ширина верхньої полицки;

b_{f2} – ширина нижньої полицки;

e_1 – відстань від центра вигину до центра верхньої полицки;

e_2 – відстань від центра вигину до центра нижньої полицки;

$e_{1,D}$ – відстань від точки обертання до центра верхньої полицки;

$e_{2,D}$ – відстань від точки обертання до центра нижньої полицки.

Ремонт та відновлення деталей машин

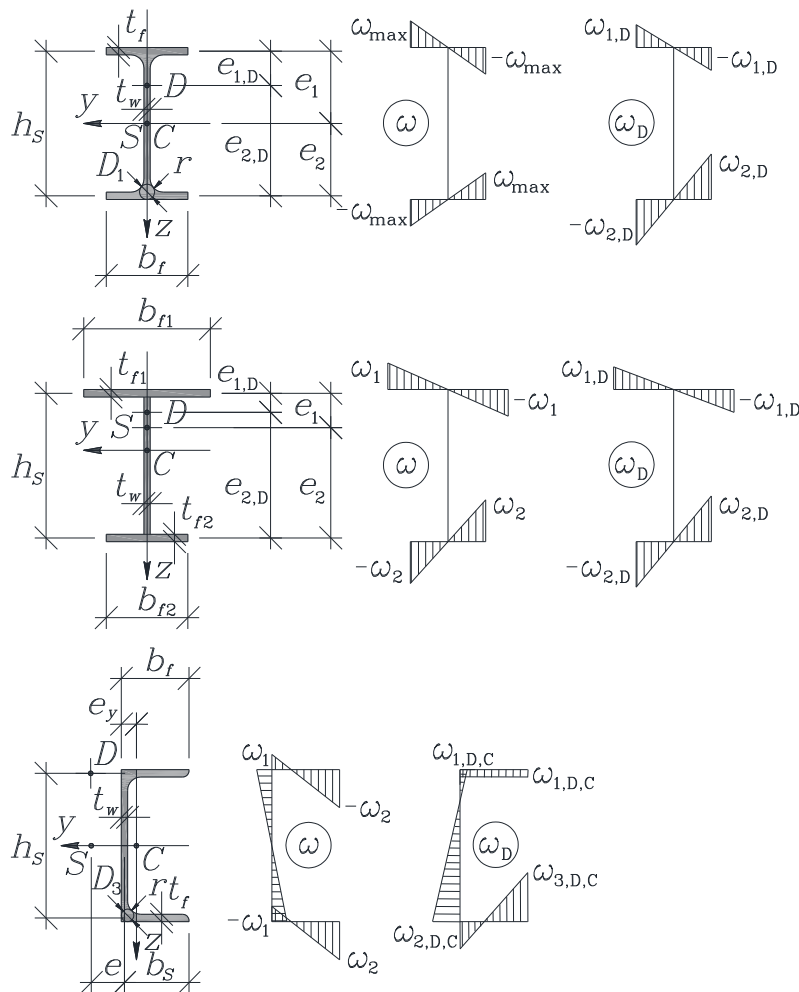


Рисунок 2 – Епюри секторальних координат перерізу для прокатних і складених балок без розкріплення і з розкріпленням

Положення осі обертання відносно центра вигину при довільній зсувній жорсткості S приєднаних конструкцій встановлюється, виходячи з міркувань, що відстань між ними при нульовій жорсткості дорівнює нулю, а при досягненні потрібної жорсткості S_a зв'язана вісь обертання балки проходить через центр верхньої полицки, де відбувається примикання бокової опори. Тоді відстані e_1 і e_2 (для прокатної балки $e_1 = e_2 = 0,5h_s$), а також відстані $e_{1,D}$ і $e_{2,D}$ становитимуть:

$$e_1 = \frac{I_{zf2}}{I_z} h_s; \quad e_2 = \frac{I_{zf1}}{I_z} h_s; \quad (30)$$

$$e_{1,D} = e_1 - \frac{S}{S_a} e_1; \quad e_{2,D} = e_2 + \frac{S}{S_a} e_1. \quad (31)$$

Для швелера секторальні координати поперечного перерізу ω_1 і ω_2 (рис. 2) без урахування розкріплення та координати $\omega_{1,D,C}$, $\omega_{2,D,C}$ і $\omega_{3,D,C}$ (вони складаються з власних координат $\omega_{1,D}$, $\omega_{2,D}$ і $\omega_{3,D}$ відносно точки обертання D та координати точки обертання D відносно центра ваги C ($\omega_{D,C}$) у випадку наявності зв'язаної осі обертання, котра проходить над центром вигину, спрощено визначаються за формулами:

Ремонт та відновлення деталей машин

$$\omega_1 = 0,5h_s e; \quad \omega_2 = 0,5h_s (b_s - e); \quad (32)$$

$$\omega_{1,D,C} = \omega_{1,D} + \omega_{D,C} = 0,5h_s (e - e_y + 0,5t_w); \quad (33)$$

$$\omega_{2,D,C} = \omega_{2,D} + \omega_{D,C} = -h_s e + 0,5h_s (e - e_y + 0,5t_w), \quad (34)$$

$$\omega_{3,D,C} = \omega_{3,D} + \omega_{D,C} = -h_s e + h_s b_s + 0,5h_s (e - e_y + 0,5t_w), \quad (35)$$

де e – відстань від центра вигину до центра стінки;

b_s – ширина полицки від вільного кінця до центра стінки;

e_y – відстань по осі y від центра ваги C до лівої грані стінки (таблична величина).

Відстань від центра вигину до центра стінки логічно визначати за правилами опору матеріалів визначення геометричних характеристик

$$e = b_s / \left(2 + \frac{h_s t_w}{3b_s t_f} \right). \quad (36)$$

Тоді секторальний момент інерції перерізу для розкріпленої швелерної балки при достатній зсувній жорсткості $S \geq S_a$ приєднаних конструкцій відносно точки обертання пропонується визначати за виведеною формулою, яка практично повністю відповідає результатам чисельних розрахунків:

$$I_{\omega,D} = b_s t_f \omega_{1,D,C}^2 + \frac{1}{3} h_s t_w (\omega_{1,D,C}^2 + \omega_{1,D,C} \omega_{2,D,C} + \omega_{2,D,C}^2) + \frac{1}{3} b_s t_f (\omega_{2,D,C}^2 + \omega_{2,D,C} \omega_{3,D,C} + \omega_{3,D,C}^2). \quad (37)$$

Ордината центра вигину S відносно центра ваги (центроїда) G дорівнюватиме:

$$z_s = \frac{1}{I_z} [I_{zf1} z_{f1} + I_{zf2} z_{f2} + I_w z_w + 2I_{r1} z_{r1} + 2I_{r2} z_{r2}]. \quad (38)$$

Коефіцієнт Вагнера для вертикальної асиметрії становитиме:

$$\beta_z = \frac{1}{2I_y} \left[z_{f1} (I_{zf1} + A_{f1} z_{f1}^2 + 3I_{yf1}) + z_{f2} (I_{zf2} + A_{f2} z_{f2}^2 + 3I_{yf2}) + z_w (I_{zw} + A_w z_w^2 + 3I_{yw}) + 2z_{r1} (4I_{r1} + A_{r1} z_{r1}^2) + 2z_{r2} (4I_{r2} + A_{r2} z_{r2}^2) \right] - z_s. \quad (39)$$

Параметр моносиметричності дорівнює:

$$z_j = -\beta_z. \quad (40)$$

Параметр стійкості (допоміжна відстань перерізу при моносиметричності) без урахування заокруглення:

$$r_y = \frac{1}{I_y} \left[z_s I_{zf1} + A_{f1} e^3 - A_{f2} (h_s - e)^3 + \frac{t_w}{4} (e^4 - (h_s - e)^4) \right], \quad (41)$$

$$\text{де } e = h_w + t_{f2} + \frac{t_{f1}}{2} - z_G; \quad h_s = h_w + \frac{t_{f1}}{2} + \frac{t_{f2}}{2}.$$

Параметр моносиметричності без урахування заокруглення становитиме:

$$z_j = z_s - \frac{r_y}{2}. \quad (42)$$

Коефіцієнт Вагнера для вертикальної асиметрії та параметр моносиметричності (від'ємний коефіцієнт Вагнера) можна достатньо точно встановити з урахуванням заокруглення (програма LTBeamN) або без урахування заокруглення (наприклад, програма ConSteel) через окремий параметр стійкості та ординату центра вигину відносно центра ваги.

ВИСНОВКИ

Урахування жорсткості приєднаних конструкцій при визначенні крутильних геометричних характеристик перерізу балки точніше відображає дійсну роботу балки у складі тримальних систем. Урахування заокруглень у місці примикання полицки до стінки дозволяє в прокатних профілях суттєво збільшити значення моменту інерції при вільному крученні. Зазначені фактори характеризують особливості роботи сталевих елементів при складному опорі, дозволяють точніше визначити значення внутрішніх зусиль, які впливають на загальний напружено-деформований стан конструкції та визначають розрахункове співвідношення. Секторальні геометричні характеристики при жорсткому розкріпленні профіля пропонується визначати відносно точки примикання бокової опори, яка розташована на осі обертання балки. Внаслідок високої збіжності результатів розрахунку і моделювання виявлено, що для швелера з достатньою жорсткістю настилу вісь обертання розташовуватиметься над центром вигину на рівні верхньої полицки.

Список використаних джерел

1. Villette M. Calcul approche de l'inertie de torsion d'une section en I ou en T // Construction métallique. – 2011. – Vol. 48, № 2. – P. 15–24.
2. Hudz S.A., Gasii G.M., Pents V.F. The Problem of Consideration Torsion Emergence in Beams // International Journal of Engineering & Technology. – 2018. – Vol. 7, № 3.2. – P. 141–148.
3. Tata Steel. Steel building design: design data. – The Steel Construction Institute and The British Constructional Steelwork Association Limited, 2013. – 690 p.
4. Kindmann R., Frickel J. Elastische und plastische Querschnittstragfähigkeit. Grundlagen, Methoden, Berechnungsverfahren, Beispiele. – Online-Auflage. – 2017. – 616 s.
5. Gale'a Y. Elastic critical lateral torsional buckling moment of beams – Presentation of LTBeam (in French) // Revue Construction Métallique. – 2003. – № 2. – P. 47–76.
6. Prokić A. Computer program for determination of geometrical properties of thin-walled beams with open–closed section // Computers & Structures. – 2000. – Vol. 74, № 6. – P. 705–715.
7. Murin J., Kutiš V. An effective finite element for torsion of constant cross-sections including warping with secondary torsion moment deformation effect // Engineering Structures. – 2008. – Vol. 30, № 10. – P. 2716–2723.
8. ДБН В.2.6-198:2014. Конструкції будівель і споруд. Сталеві конструкції. Норми проектування / Остаточна редакція. Видання офіційне. – К. : Мінрегіонбуд України, 2014. – 199 с.

Hudz S.A., Godun T.M., Dariienko V.V.

REFINEMENT OF GEOMETRICAL PROPERTIES OF OPEN THIN-WALLED CROSS-SECTIONS

The paper deals with the issue of refinement of geometrical properties of open thin-walled cross-sections of steel beams under the action of an eccentrically applied load, which leads to torsion. In this case, the supporting elements are in conditions of complex spatial operation of the frame system. Attention is paid to the need to take into account the real structural features of the cross-sections that affect the distribution of stresses and strains during operation. The influence of rounding at the junction of the flange to the web of rolled open profiles, which leads to a significant increase in the torsion constant, is investigated.

A refined approach to the determination of the warping constant is proposed, which takes into account not only the geometric parameters of the cross-section but also the stiffness characteristics of the attached structural elements. This makes it possible to more accurately model the operating conditions of a beam as part of a spatial system, in particular, when it is rigidly detached from the bending plane. The refinement of these properties avoids significant errors in the determination of normal stresses in the cross-section, which in turn affects the overall spatial stability and operational reliability of the structure.

The use of refined properties ensures a uniform distribution of stresses, more rational use of material strength and avoidance of local overloads, which is critical for thin-walled elements. Taking these factors into account improves the accuracy of calculations, reduces the material consumption of structures, improves technical and economic performance, and ensures the durability of the designed objects. The calculations that use these geometric characteristics include the conventional calculation of beams for general stability and an alternative calculation based on the second-order theory; calculation for the combined effect of transverse bending (in one or two planes) and torsion due to eccentricity of load application; calculation of beams with damage and distortion.

Keywords: geometrical properties, open cross-sections, bending, torsion.

Стаття надійшла 06.05.2025 р.

УДК 621.867.2

doi.org/10.31498/2522-9990292025330264

Нефьодов І.О., Лаврик В.П., Суглобов В.В.

ДОСЛІДЖЕННЯ УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ФРОНТАЛЬНИХ НАВАНТАЖУВАЧІВ

Досліджено умови експлуатації навантажувачів в морських портах та виникаючі при цьому пошкодження вантажопідійомників. Розроблено твердотільні моделі для дослідження напружено-деформованого стану металоконструкції вантажопідійомника автонавантажувачів методом кінцевих елементів, які дозволили виявити найбільш навантажені ділянки - опора направляючого ролика, бічний лист внутрішньої рами, напрямний ролик.

Запропоновано використання пружних амортизаторів, які крім амортизації динамічних навантажень забезпечують демпфування коливань за рахунок внутрішнього тертя пружних матеріалів. Надано рекомендації щодо вибору матеріалів пружних амортизаторів для балансирних візків з урахуванням їхньої амортизуючої та демпфуючої здібностей.

Ключові слова: автонавантажувачі, вантажопідійомник, амортизуючи та демпфуючої здібності, матеріали пружних амортизаторів.